https://doi.org/10.15407/frg2021.03.187
УДК 575.113.2:577.112.82

НОВІ НАУКОВІ НАПРЯМИ ГЕНЕТИЧНОГО ПОЛІПШЕННЯ ЗЛАКОВИХ КУЛЬТУР

В.В. МОРГУН[2], О.І. РИБАЛКА[1,2], Б.В. МОРГУН[2,3]

[1]Селекційно-генетичний інститут—Національний центр насіннєзнавства та сортовивчення Національної академії аграрних наук України
65036 Одеса, Овідіопольська дорога, 3
[2]Інститут фізіології рослин і генетики Національної академії наук України
03022 Київ, вул. Васильківська, 31/17
[3]Інститут клітинної біології та генетичної інженерії Національної академії наук України
03680 Київ, вул. Академіка Заболотного, 148
e-mail: molgen@icbge.org.ua

Ґрунтуючись на генетичній базі, оригінальній за походженням і впливом на біосинтез білків, крохмалю, біоактивних компонентів зерна, ми ініціювали кілька нових напрямів селекції озимої пшениці, озимої пшениці-спельти, озимого та ярого голозерного ячменю й озимого тритикале, яких раніше не було в Україні. Кінцева мета цих ініціатив — виведення на зерновий ринок України нових сортів озимої пшениці, пшениці-спельти, ярого й озимого голозерного ячменю, озимого тритикале з біохімічними, технологічними і харчовими характеристиками зерна, необхідними для розробки нових продуктів харчування з функціональним статусом, а також нових напрямів технологічного використання зерна. Генетична база наших селекційних програм, спеціально створена або перенесена в геном культурної пшениці від дикорослих видів (егілопсів *Aegilops tauschii* (2n = 2x = 14), *Aegilops cylindrica* (2n = 4x = 28), дикорослого емера *Triticum dicoccoides* (2n = 4x = 28), дає нам змогу сьогодні створювати сорти хлібопекарської і бісквітної пшениці екстрависокої якості як на червонозерній, так і на білозерній основі, чого досі не було у вітчизняній селекції. У наших селекційних програмах вперше з'явився генетичний ресурс для цілеспрямованого широкомасштабного керування консистенцією ендосперму пшениці, харчовими і технологічними характеристиками крохмалю, твердістю зерна, технологічними і борошномельними характеристиками зерна, що також є новим для української селекції й істотно розширює технологічний потенціал культури пшениці. Ми першими в Україні ініціювали створення сортів озимої хлібопекарської пшениці і пшениці-спельти, харчового голозерного ячменю з кольоровим (фіолетовим, синім, чорним) зерном, що радикально поліпшить харчовий і функціональний статус зерна хлібопекарської пшениці, пшениці-спельти і харчового голозерного ячменю та продуктів їх переробки. У зв'язку зі створенням кольорових сортів пшениці і голозерного ячменю та різноманіттям зерна за твердістю ми ініціювали принципово новий напрям в українській селекції — створення сортів пшениці і голозерного ячменю з кольоровим зерном спеціального круп'яного напряму використання (крупи, пластівці, екструдовані

Цитування: Моргун В.В., Рибалка О.І., Моргун Б.В. Нові наукові напрями генетичного поліпшення злакових культур. *Фізіологія рослин і генетика*. 2021. 53, № 3. С. 187—215. https://doi.org/10.15407/frg2021.03.187

продукти) та наголошуємо на популяризації серед населення України функціональних продуктів харчування із цільного зерна кольорових сортів злаків як важливого харчового чинника, спрямованого на поліпшення фізичного здоров'я нації. Вперше в Україні ми ініціювали і забезпечили спеціальною генетичною базою програму селекції сортів голозерного ячменю (ярого, озимого й альтернативного типів розвитку) харчового напряму використання з підвищеним вмістом у зерні білка, розчинної дієтичної клітковини (бета-глюканів), засвоюваного мінерального фосфору, біоактивних поліфенольних сполук антоціанінів і фітомеланінів з високою антиоксидантною активністю, з підвищеним вмістом у крохмалі амілози й резистентного крохмалю, а також створення голозерного ячменю з унікальними харчовими характеристиками й ультранизьким вмістом у зерні глютену. На підставі результатів світових і власних досліджень ми вважаємо, що питання харчової цінності зернових злаків в Україні має набути статусу стратегічної державної програми, спрямованої на оздоровлення української нації.

Ключові слова: пшениця, спельта, ячмінь голозерний, тритикале, якість зерна, білки, резистентний крохмаль, інтрогресія генів, амілоза, амілопектин, антоціаніни, антиоксиданти.

Створення нових сортів сільськогосподарських культур — благородна місія, яку здійснює селекціонер. Однак створити новий сорт — це одне, а створити й обґрунтувати новий напрям (чи напрями) селекції — зовсім інше. І вдається це зробити далеко не кожному пересічному селекціонеру. Адже новий напрям селекції потребує впровадження у селекційний процес докорінно іншого генетичного матеріалу, інших стратегії і технології селекції, особливостей контролю селекційних ознак і добору в популяціях, методів оцінювання селекційного матеріалу. А найголовніше — створення нових напрямів селекції можливе лише у плідній співпраці селекції, генетики і біотехнології.

Нові напрями селекції зернових культур ми створюємо у творчій співпраці фахівців двох академій — НАН і НААН України. Творча співдружність започаткована у 2010 р. і триває досі між Інститутом фізіології рослин і генетики НАН України, Інститутом клітинної біології та генетичної інженерії НАН України та Селекційно-генетичним інститутом—Національним центром насіннєзнавства та сортовивчення НААН України. В результаті цієї плідної співпраці були закладені наукові підвалини і теоретично обґрунтовані докорінно нові для України напрями селекції озимої пшениці, пшениці-спельти, озимого та ярого (голозерного) ячменю озимого тритикале, про які і йтиметься в цій статті.

Сучасні селекційні програми пшениці потребують постійного збагачення новою генетичною плазмою — це незмінна умова, без якої прогрес у селекції неможливий. У розвинених країнах світу кожна поважна селекційна установа має спеціальний підрозділ (pre-breeding), метою якого є створення вихідного матеріалу для селекції на основі використання новітніх генетичних і біотехнологічних розробок.

Сучасні трансгенні технології, а також технології редагування геномів, такі, як CRISPR-Cas9 (Cas13a) та технологія цілеспрямованих мутацій TILLING, дають змогу отримувати новітній генетичний матеріал для селекції, якого раніше ніколи не було в природі [1].

Однак, незважаючи на фантастичні можливості цих новітніх технологій, які, на жаль, не представлені належним чином в Україні, ресурс такого потужного джерела генетичної плазми, як віддалена гібридизація, ще далеко не вичерпаний. Прикладом може бути пшениця, де інтрогресія в культуру генетичного різноманіття віддалених видів триває багато десятиліть, але й досі дикорослі злаки залишаються важливим джерелом агрономічно цінних генів для поліпшення нових сортів культури.

До сьогодні для створення нового селекційного матеріалу пшениці в провідних селекційних центрах світу найактивніше використовують генетичне різноманіття дикорослого егілопсу *Ae. tauschii* (DD, 2n = 2x = = 14), який є донором ключового геному D культурної гексаплоїдної пшениці *T. aestivum* L. і відповідає за найважливіші агрономічні характеристики пшениці, такі як урожай, його якість, стійкість до фітопатогенів та агресивних чинників середовища вирощування включно з посухою. Генетична варіабельність егілопсу *Ae. tauschii* незрівнянно (у кілька тисяч разів) вища, ніж генетичне різноманіття сортів пшениці.

Найефективнішим шляхом інтрогресії в культуру генетичної плазми *Ae. tauschii* є використання у схрещуваннях із культурною пшеницею штучно створених гексаплоїдних синтетиків із геномною формулою AABBDD (2n = 6x = 42), в яких геноми A і B походять від твердої пшениці чи дикорослої двозернянки, а геном D — від егілопсу *Ae. tauschii.* Доведено, що гексаплоїдні синтетики є потужним джерелом поліпшення культурної пшениці за комплексом агрономічних ознак, таких як зернова продуктивність, стійкість до біотичних і абіотичних чинників, і є чи не єдиним джерелом поліпшення культурної пшениці за такою стратегічно важливою ознакою, як посухостійкість [2, 3].

У нашій програмі створення оригінального селекційного матеріалу пшениці ми використовуємо у схрещуваннях з культурною пшеницею два головних донори геному D — пшениці егілопси ендемічний *Ae. cylindrica* (CCDD, 2n = 4x = 28) та *Ae. tauschii*, останній — у формі гексаплоїдних синтетиків (рис. 1).

У результаті виконання програми віддалених схрещувань, яка практично триває й досі, та застосування *know-how* у роботі з селекційним матеріалом ми отримали серію високопродуктивних, стійких до посухи і низки фітопатогенів інтрогресивних ліній пшениці з екзотичними *Gli/Glu* алелями від дикорослих видів, що позитивно впливають на хлібопекарські властивості борошна, підвищують (або істотно знижують) твердість зерна як важливу технологічну, борошномельну і хлібопекарську характеристику [4].

За використання дикорослих егілопсів-донорів геному D у схрещуваннях з культурною пшеницею ми отримали інтрогресивні селекційні лінії пшениці з урожаєм зерна ~10 т/га, відмінною хлібопекарською якістю борошна, ефективною стійкістю до хвороб і високою посухостійкістю. Перспективні селекційні лінії, похідні від віддалених схрещувань, передані до державного сортовипробування. У результаті два сорти озимої пшениці Аміна і Джамала, придатні для поширення на Півдні України, занесені до Держреєстру сортів України.

Від схрещувань з *Ae. tauschii* в геном пшениці від дикорослої ми перенесли унікальний чужинний алель гена *Ha*(ts), що детермінує ек-

а *б*

Рис. 1. Зразки колосів дикорослих видів-донорів ключового геному D м'якої пшениці: *а* — *Aegilops tauschii* (DD, 2n = 2x = 14); *б* — *Aegilops cylindrica* (CCDD, 2n = 4x = 28)

страекспресію білків крохмальних гранул фріабілінів і відповідно екстрам'який тип консистенції ендосперму пшениці (рис. 2).

Алель гена *Ha*(ts) унікальний і не трапляється в жодного з відомих сортів пшениці. Він фенотипно виявляється у формі екстрам'якозерної консистенції ендосперму (extra-soft), а на електрофореграмі (див. рис. 2) — у вигляді інтенсивної смужки (зразки *3*, *4*, *6*) із дещо вищою електрофоретичною рухливістю порівняно з таким самим білком, характерним для м'якозерної пшениці (soft). Унікальний алель *Ha*(ts) легко ідентифікується на інфрачервоному аналізаторі моделі Inframatic 8611 у від'ємному діапазоні значень твердості зерна від —45 до —55...—60, тоді як твердість звичайної м'якозерної хлібопекарської пшениці змінюється в основному в додатному і досить рідко — у від'ємному діапазоні значень близько нуля.

Інтрогресований від егілопсу *Ae. tauschii* алель *Ha*(ts) обрано за генетичну основу для створення нового для України класу сортів пшениці (extra-soft) з екстрам'яким ендоспермом бісквітного (кондитерського) напряму використання [5].

На основі цього унікального генетичного матеріалу ми створили і внесли до Держреєстру України два сорти екстрам'якозерної пше-

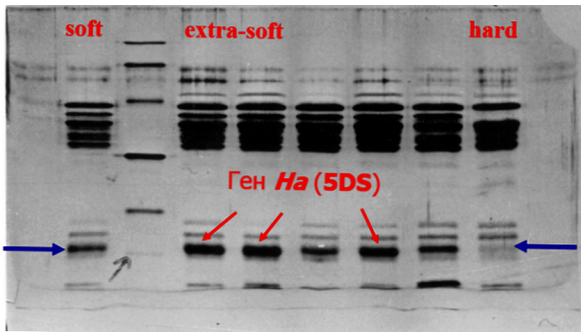


Рис. 2. Інтрогресія в геном пшениці від дикорослого егілопсу. Стрілками позначені білки крохмальних гранул, що кодуються алелем *Ha*(ts) з екстраекспресією (*3*, *4*, *6*), інтрогресованим у пшеницю від егілопсу *Ae.tauschii* (C. Morris, WWQL, USA, 2002)

ниці: червонозерний Оксана та перший в Україні сорт білозерної пшениці Білява. Алель *Ha*(ts) ми продовжуємо активно застосовувати у селекційних програмах зі створення нових сортів пшениці кондитерського напряму використання.

Для селекції сортів хлібопекарської пшениці з генетично детермінованою високою та екстрависокою хлібопекарською якістю особливо цінними є гени із сильними позитивними ефектами на цю ознаку. Для створення таких сортів ми маємо в розпорядженні цілий генетичний арсенал оригінальних алелів *Gli/Glu*-локусів із сильним позитивним впливом на реологічні властивості тіста з борошна пшениці.

Так, від егілопсів *Ae. tauschii* та *Ae. cylindrica* в геном пшениці були інтрогресовані відповідно два алелі *Gli-D1*(ts) і *Gli-D1*(cyl) із позитивним ефектом на реологію тіста, вищим, ніж в інших алелях локусу *Gli-D1*, що поширені серед сортів пшениці української селекції (рис. 3). Алелі *Gli-D1*(ts) і *Gli-D1*(cyl) також оригінальні і не трапляються у сортів пшениці української селекції.

У наших дослідах ми спостерігали помітний ефект обох алелів *Gli-D1*(ts) і *Gli-D1*(cyl) на підвищення ознаки твердості зерна, частка впливу кожного з них перевищувала 15 %.

У селекційній програмі ми використовуємо три унікальні алелі локусу *Glu-1*, що кодує біосинтез високомолекулярних глютенінів: 1) алель *Glu-B1al* (77+8) (з екстраекспресією субодиниці 7 високомолекулярних глютенінів), який виник у результаті спонтанної тандемної дуплікації гена, що контролює біосинтез субодиниці 7 [6];

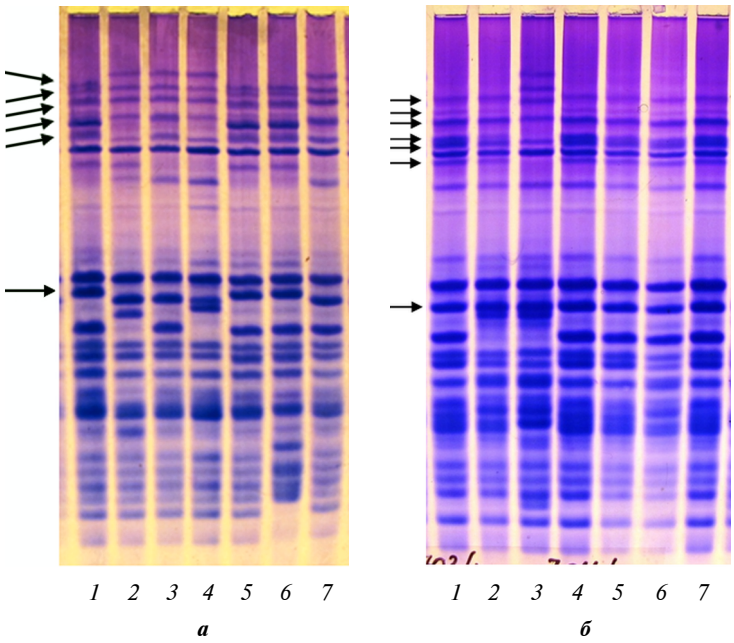


Рис. 3. Інтрогресія в геном пшениці від дикорослих егілопсів екзотичних алелів з позитивним впливом на хлібопекарську якість:

а — білки (позначено стрілками), що кодуються алелем локусу *Gli-D1*(ts) (зразки *1*, *5*, *6*), інтрогресованим у пшеницю від егілопсу *Ae. tauschii*, (*2—4* — пшеничний тип); *б* — білки (позначено стрілками), що кодуються алелем локусу *Gli-D1*(cyl) (зразки *1*, *2*, *4—7*) інтрогресованим у пшеницю від егілопсу *Ae. cylindrica* (*3* — пшеничний тип)

2) алель *Glu-D1x5* зі штучно індукованою екстраекспресією субодиниці 5 високомолекулярних глютенінів; 3) алель *Glu-A1x2** зі штучно індукованою екстраекспресією субодиниці 2* високомолекулярних глютенінів [7].

Усі ці три алелі локалізовані в довгих плечах різних хромосом гомеологічної групи 1 (1B, 1D, 1A), успадковуються незалежно, легко детектуються за допомогою відповідних функціональних та молекулярних маркерів і комбінуються в одному генотипі, що дає змогу створювати селекційний матеріал пшениці із запрограмованою екстрависокою хлібопекарською якістю борошна (рис. 4).

У табл. 1 наведено результати дослідження ефектів екстраекспресії алелів *Glu-D1x5* та *Glu-A1x2** на урожай і показники його якості у константних селекційних ліній пшениці > F7. Із цих даних видно, що лінії з екстраекспресією субодиниці *Glu-D1x5* давали в середньому дещо нижчий урожай зерна з 1 м рядка порівняно зі стандартним сортом Куяльник. Лінії з екстраекспресією субодиниці *Glu-A1x2** за урожаєм зерна з 1 м рядка від сорту Куяльник практично не відрізнялися. Лінії з екстраекспресією обох субодиниць *Glu-D1x5* і *Glu-A1x2** мали в середньому більш виповнене зерно, ніж сорт Куяльник. За вмістом білка в зерні обидва варіанти екстраекспресії субодиниць *Glu-D1x5* і *Glu-A1x2** достовірно переважали сорт Куяльник, особливо виділялися лінії з екстраекспресією субодиниці *Glu-A1x2*,* які за середнім вмістом білка в зерні (13,0 %) істотно переважали сорт Куяльник (10,7 %).

Особливо помітний сильний ефект екстраекспресії обох субодиниць *Glu-D1x5* і *Glu-A1x2** на ознаку твердості зерна. Лінії з екстраекспресією *Glu-D1x5* у середньому ледве не вдвічі (58 проти 32) переважали сорт Куяльник за твердістю зерна. Особливо сильним був ефект екстраекспресії субодиниці *Glu-A1x2** на показник седиментації борошна SDS-30K, який у середньому на 22 мл перевищував значення (70 мл) седиментації для сорту Куяльник. Разом з тим ефект екстраекспресії субодиниці *Glu-D1x5* негативно відбився на показнику SDS-30K седиментації, достовірно знизивши його в середньому на 17 мл порівняно зі значенням седиментації борошна сорту Куяльник (53 проти 70 мл).

Негативний ефект екстраекспресії субодиниці *Glu-D1x5* на показник седиментації можна пояснити тим, що екстрадоза субодиниці

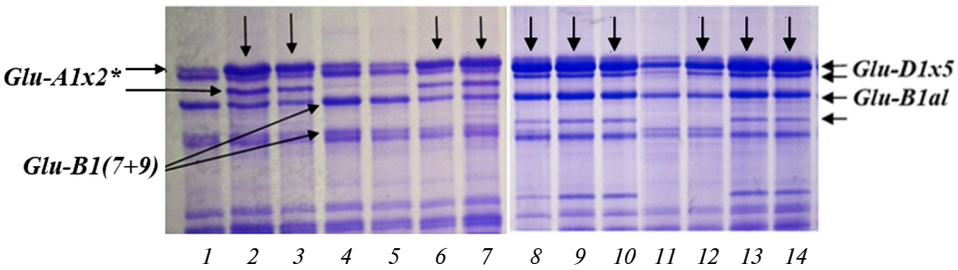


Рис. 4. Електрофореграми міні-SDS-електрофорезу високомолекулярних глютенінів селекційних ліній пшениці з екстраекспресією субодиниці *Glu-A1x2** (*2*, *3*, *6*, *7*) та субодиниці *Glu-D1x5* (*8—14*). Алель *Glu-B1al* — *8—10*, *13*, *14*

ТАБЛИЦЯ 1. Вплив екстраекспресії алелів з екстраекспресією субодиниць високомолекулярних глютенінів Glu-D1x5 та Glu-A1x2 на урожай і характеристики якості зерна озимої пшениці (урожай 2018 р.)*

Номер зразка	Походження	Маса зерна з 1 м рядка, г	Виповненість зерна, бал	Вміст протеїну у зерні, %	Твердість зерна за Inframatic 8611	Седиментація борошна за SDS-30K, мл
804/69	Куяльник	264	3,8	10,3	34	61
808/70		302	4,0	9,8	30	68
818/71		293	3,8	11,4	32	74
822/69		297	3,8	10,5	24	64
827/70		330	4,0	11,1	35	80
827/71		279	4,0	11,0	35	74
	Усереднено	**294**	**3,9**	**10,7**	**32**	**70**
		Glu-D1x5 (***)				
823/52	F7, Кул × *Glu-D1x5* (***)	277	4,0	11,7	53	53
823/55		218	4,0	12,5	58	51
823/57		265	4,0	12,3	69	53
823/68		272	4,3	11,2	61	50
823/73		241	4,3	10,5	56	54
823/74		284	3,8	11,6	57	53
823/75		215	4,3	12,1	62	54
823/79		300	4,0	11,6	53	52
823/81		219	4,3	11,2	55	52
823/90		257	4,3	12,6	55	58
	Усереднено	**255**	**4,1**	**11,7**	**58**	**53**
	$t_{факт}$	2,98*	3,08**	3,28**	11,28**	5,76**
$t_{табл\ 05}$ — 2,15; $t_{табл\ 01}$ — 2,98						
		*Glu-A1x2** (***)				
823/112	F7, Кул × *Glu-A1x2** (***)	213	4,3	13,2	46	92
823/114		194	4,3	10,9	37	84
823/115		262	3,8	13,9	57	92
823/118		256	4,0	13,6	50	93
823/121		251	3,8	12,3	52	91
823/122		330	4,3	13,0	41	94
823/124		288	4,0	14,2	49	94
823/125		263	3,8	13,3	58	92
823/130		342	4,0	13,4	46	94
823/132		366	4,3	12,9	55	93
823/133		304	4,0	13,5	35	94
823/136		357	4,3	12,2	52	92
	Усереднено	**286**	**4,1**	**13,0**	**48**	**92**
	$t_{факт}$	0,47	2,30*	6,67**	5,97**	7,28**
$t_{табл\ 05}$ — 2,12; $t_{табл\ 01}$ — 2,92						

Примітка. Тут і в табл. 2: Кул — Куяльник.

Glu-D1x5 призводить до утворення у клейковині надмірної кількості міжмолекулярних S—S-зв'язків, які надають їй незвичайно високої пружності, що й виявляється в істотному підвищенні твердості зерна й відповідно зниженні SDS-30K седиментації, яка чітко реагує на збільшений розмір часточок борошна при помелі зерна з високою твердістю.

У світовій селекції пшениці (і в Україні також) використовують центричну пшенично-житню хромосомну транслокацію головно у двох варіантах: 1RS.1BL та 1RS.1AL, яка несе комплекс генів стійкості до фітозахворювань (*Lr26, Sr31, Yr9, Pm8*) і позитивно впливає на урожай зерна [8]. Однак житній локус *Sec-1* у короткому плечі хромосоми жита 1RS різко знижує хлібопекарську якість борошна (рис. 5).

Для елімінації негативного впливу транслокацій 1RS.1BL та 1RS.1AL на хлібопекарську якість борошна ми використовуємо в селекційній програмі хромосомно-інженерну модифікацію транслокації 1RS.1BL, створену професором А. Лукашевським (A. Lukazsewsky, California University, Riverside, USA), в якій житній, негативний щодо хлібопекарської якості локус *Sec-1* заміщений на позитивний для якості пшеничний локус *Gli-B1*, а інші селекційно-позитивні ефекти збережені. На основі цієї хромосомної транслокації ми цілеспрямовано отримали рекомбінантну лінію пшениці, в довгому плечі хромосоми 1BL якої алель *Glu-B1*(17+18) замінений на алель *Glu-B1al* із сильним позитивним впливом на хлібопекарські властивості борошна. Отриману рекомбінантну лінію 1RSm.1BL(*Glu-B1*(77+8)) ми використовуємо у селекційних програмах для поліпшення хлібопекарської якості сортів пшениці з транслокаціями 1RS.1BL та 1RS.1AL (див. рис. 5).

Із використанням житньо-пшеничних хромосомних транслокацій 1RS.1BL та 1RS.1AL ми створили серію сортів озимої пшениці (Смуглянка, Чорнява, Фаворитка, Астарта та ін.), які дають рекордні урожаї зерна і займають в Україні домінуючі посівні площі.

З викладеного випливає, що ми створили цінний генетичний ресурс не лише для селекційного поліпшення хлібопекарської якості бо-

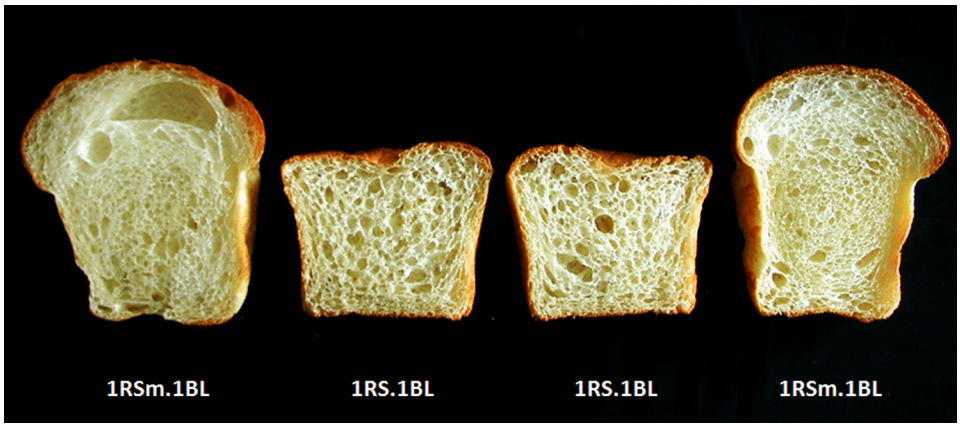


Рис. 5. Об'єм хліба з борошна селекційної лінії пшениці з модифікованою житньо-пшеничною транслокацією 1RSm.1BL порівняно із селекційною лінією з оригінальною 1RS.1BL транслокацією

рошна, а й для підвищення важливої технологічної ознаки твердості зерна, яка є його головною борошномельною характеристикою [4].

Вміст білка у зерні — перший показник, що лімітує як харчові, так і технологічні характеристики зерна пшениці. Найвідоміші дослідження, спрямовані на підвищення вмісту в зерні пшениці протеїну, виконувалися в Департаменті сільського господарства США (USDA ARS) спільно з Університетом штату Небраска (Prof. V. Johnson) упродовж більш як 30 років (1954—1985). Автори цих досліджень дійшли висновку, що вміст у зерні пшениці протеїну є досить складною кількісною ознакою з чітко вираженою оберненою залежністю від рівня урожаю зерна, яка значно більше залежить від середовища та умов вирощування, ніж від генотипу, контролюється комплексом генів з адитивними й неадитивними ефектами та є складнодосяжною для істотного поліпшення методами традиційної селекції [8]. Майже в кожній з 21 хромосоми пшениці локалізовані гени з помітним або мінорним впливом на загальний вміст білка в зерні пшениці [9].

Серед колекційних зразків пшениці Ізраїлю нещодавно виявлено дикорослу пшеницю емер *T. turgidum* ssp. *dicoccoides* (Korn) Thell, у хромосомі 6B якої ідентифіковано QTL-фактор *Gpc-B1*, що істотно підвищує вміст білка в зерні та ключових мінералів (Fe, Zn, Mn) [10, 11].

Детальне дослідження гена *Gpc-B1* як фактора, що кодує NAC-доменний білок, дало змогу чітко визначити його позицію на хромосомі 6B, ідентифіковану як послідовність розміром 7400 пн, розміщену між маркерними локусами *Xucw* 109 та *Xuhw* 106. Маркерний локус *Xuhw* 84, ортологічний гену рису OSJNBa002E05.19-1, виявився тісно зчепленим з *Gpc-B1*, його можна використовувати як достатньо надійний маркер для детекції *Gpc-B1* у селекційних популяціях [12, 13]. Ефективність гена *Gpc-B1* як фактора, що здатний істотно підвищити вміст у зерні пшениці білка й мікроелементів (без зниження врожаю), доведено в численних дослідженнях у різних країнах протягом понад 10 останніх років і рекомендовано його широке використання в селекції [14].

Джерело гена *Gpc-B1* ми отримали від професора Д. Дубковського (Prof. J. Dubcowsky, California University, Davis, USA) у вигляді 6B хромосомно-заміщеної лінії від *T. turgidum* ssp. *dicoccoides.* Цей цінний генетичний матеріал сумісно з асоційованими з геном *Gpc-B1* молекулярними маркерами ми успішно використовуємо у селекційній програмі, спрямованій на підвищення в зерні пшениці вмісту білка та ключових мікроелементів [15—17].

Дані табл. 2 демонструють ефект гена *Gpc-B1* за вмістом білка в зерні у двох групах перспективних селекційних ліній пшениці, дібраних із різних комбінацій схрещування, в генотипі яких ген наявний (*Gpc-B1*+) або відсутній (*Gpc-B1*−).

Так, генотипи з геном *Gpc-B1*+ порівняно з генотипами без нього *Gpc-B1*− містили протеїну в зерні в середньому більше на 2,1 % і переважали останніх за індексом SDS-30K седиментації у середньому на 20 мл.

Не виявлено істотної різниці між *Gpc-B1*+ та *Gpc-B1*− генотипами за урожаєм зерна з 1 м рядка та твердістю зерна. Разом з тим генотипи *Gpc-B1*+ порівняно з генотипами *Gpc-B1*− мали достовірно

нижчу виповненість зерна. Як свідчить світова селекційна практика використання гена *Gpc-B1*, виповненість зерна можна істотно поліпшити добором генотипів із геном *Gpc-B1*+ у комбінації з молекулярними маркерами для генів, що поліпшують виповненість зерна і нівелюють різницю за цією ознакою між генотипами *Gpc-B1*+ і *Gpc-B1*−. Ми отримали перспективні селекційні лінії з геном *Gpc-B1*, які не поступаються за урожайністю ліпшим сортам-стандартам, мають задовільну виповненість зерна і вміст білка на 1,5—2,0 % вищий, ніж стандарти.

Вміст білка в зерні є ознакою стратегічного значення для культури пшениці, тому, врахувавши успішний світовий досвід використання гена *Gpc-B1*, ми вважаємо, що ген *Gpc-B1* як цільовий має бути наявним в усіх селекційних програмах створення в Україні сортів пшениці високої хлібопекарської якості, з високим вмістом у зерні білка і ключових мікроелементів.

Отже, як випливає з викладеного матеріалу, наша селекційна програма пшениці сьогодні базується на комплексі генетичних факторів, що впливають як на вміст білка в зерні, так і на його якість, що реалізується у високих реологічних і хлібопекарських характеристиках тіста. Цей генетичний ресурс уможливлює створення сортів пшениці з будь-яким бажаним рівнем хлібопекарської якості борошна включно з екстрависоким.

Крохмаль пшениці — основний інгредієнт хліба і хлібопродуктів. Крохмаль зернових культур становить 65—70 % маси зерна, складається з двох нерозчинних у воді гомоглюканів — 25—28 % амілози (лінійний полімер глюкози) та 72—75 % амілопектину (розгалужений полімер глюкози).

Співвідношення компонентів крохмалю амілоза : амілопектин для всіх ключових зернових культур має стратегічно важливе технологічне і харчове значення. Це співвідношення у гексаплоїдної пшениці регулюється генетично підвищенням вмісту амілози відносно амілопектину або навпаки, зниженням до нуля вмісту амілози по відношенню до амілопектину. Знизити вміст амілози у крохмалі можна частковим чи повним блокуванням функції ключового ферменту крохмальних гранул *GBSS*, що контролює біосинтез амілози. Біосинтез ферменту *GBSS* у пшениці кодують три гени: *WxA1* (хромосома 7AS), *WxB1* (хромосома 4AL) та *WxD1* (хромосома 7DS). Рецесивний алель кожного з цих генів блокує біосинтез амілози. За наявності у генотипі трьох рецесивних алелів цих генів синтезується крохмаль з нульовим або мінімальним вмістом амілози (ваксі) [18].

Сучасна селекція пшениці досягла вагомих успіхів у підвищенні врожаю зерна культури. Однак харчовий статус крохмалю зерна сучасних сортів звичайної пшениці доволі низький, оскільки пшеничний крохмаль містить до 70—75 % амілопектину (тип А), який дуже швидко метаболізується у шлунково-кишковому тракті (ШКТ) людини, трансформується у глюкозу, високий пік концентрації якої в плазмі крові людини є підґрунтям для розвитку таких небезпечних патологій, як метаболічний синдром та цукровий діабет другого типу. Тому для поліпшення харчового статусу пшеничного крохмалю (як і будь-якого іншого зернового) важливо змінити співвідношення

ТАБЛИЦЯ 2. Вплив гена Gpc-B1 на урожай, вміст білка в зерні та технологічні характеристики зерна генотипів озимої пшениці, гомозиготних за цільовим геном Gpc-B1

Номер зразка	Походження	Маса зерна з 1 м рядка, г	Виповненість зерна, бал	Вміст протеїну у зерні, %	Твердість зерна за Inframatic 8611	Седиментація борошна за SDS-30K, мл
		Gpc-B1+				
824/35	F7, *Gpc-B1* × Куяльник	257	3,0	13,9	42	93
825/25	F4, Кул* x 26/122(F4, *Gpc-B1* × Кул)	292	3,3	13,4	34	92
825/29		217	2,8	14,3	35	91
825/46		283	3,8	12,6	28	93
826/38		211	3,0	14,1	38	92
826/42		250	3,8	12,5	21	93
826/45		225	2,8	14,4	1	96
826/47		223	2,8	13,5	10	95
827/38	F4, Кул × 635/76(*GpcB1*)	271	3,8	12,5	12	88
827/40		234	3,8	12,7	19	88
827/41		271	3,3	13,0	20	93
828/41		315	3,8	12,8	17	91
828/42		249	3,0	12,9	18	87
828/45		279	2,8	13,2	9	86
828/47		293	3,3	12,9	13	90
828/48		298	3,0	13,5	6	94
	Усереднено	**261**	**3,2**	**13,3**	**20**	**91**
		Gpc-B1−				
822/34	F4, Кул × 425/1-49(*Gpc-B1*)	333	3,8	10,0	39	58
822/39		307	3,8	11,2	8	62
823/32		283	4,0	9,1	18	50
823/33		227	3,8	9,5	30	50
824/31	F7, *Gpc-B1* × Куяльник	189	3,8	10,5	18	70
824/32		149	3,0	11,6	8	68
824/37		259	3,8	11,1	11	64
824/41	F4, Кул × 26/122(F4, *Gpc-B1* × Кул)	286	3,0	11,9	14	80
825/28		298	4,0	12,1	27	74
825/32		285	3,3	11,3	21	63
825/33		253	3,8	10,2	21	55
825/37		263	3,8	11,8	31	80
825/45		240	3,8	12,0	26	81
826/30		243	4,0	12,0	29	77
826/37		263	3,0	11,6	26	80
826/41		231	3,0	11,8	25	74
826/48		285	3,8	11,5	17	76
827/39	F4, Кул × 635/76(*GpcB1*)	313	3,8	11,3	15	76
827/42		244	3,8	11,6	13	77
828/46		300	3,8	11,9	13	85
	Усереднено	**263**	**3,6**	**11,2**	**21**	**70**
	$t_{факт}$	0,16	2,96**	8,17**	0,09	8,56**
	$t_{табл\ 05}$ — 2,03; $t_{табл\ 01}$ — 2,73					

амілоза : амілопектин у бік підвищення вмісту амілози, яка значно повільніше за амілопектин метаболізується в глюкозу і формує у зерні фракцію так званого резистентного до ферментів травлення ШКТ крохмалю. Резистентний крохмаль практично не гідролізується ферментами травлення у ШКТ людини і виявляє властивості, подібні до некрохмалистих полісахаридів (дієтичної клітковини) типу пентозанів, арабіноксиланів, β-глюканів, які є типовими пребіотиками, що метаболізуються кишковими бактеріями пробіотиками, забезпечують фізичне здоров'я кишківника, а відтак і здоров'я всього організму людини.

Вміст амілози у крохмалі пшениці від норми 20—25 % до більш як 70 % підвищують використанням щонайменше двох біотехнологічних процедур: а) технології РНК-інтерференції (RNAi) і блокування функції одного з ключових ферментів *SBEIIa*, відповідального за розгалуження молекули амілопектину; б) технології TILLING утворення стоп-кодону у смисловій послідовності цільового *SBEIIa* гена та повного блокування його транскрипції.

Вихідні генотипи пшениці з блокованим *SBEIIa* геном ми отримали з двох науково-дослідних установ Італії та США від їх оригінаторів (Prof. D. Lafiandra, Tuscia University, Viterbo, Italy; Prof. J. Dubcowsky, California University, Davis, USA) і використовуємо у схрещуваннях для створення пшениці з високим вмістом у крохмалі амілози (> 70 %), підвищеним вмістом резистентного крохмалю та радикально поліпшеним харчовим статусом зерна. Блокований *SBEIIa* ген у селекційних популяціях пшениці контролюємо за допомогою полімеразної ланцюгової реакції (ПЛР) із використанням специфічних праймерів. Наразі ми отримали перспективний селекційний матеріал від схрещування комерційних сортів пшениці з обома джерелами високого вмісту амілози у крохмалі та досліджуємо його за агрономічними характеристиками й вмістом амілози у крохмалі [19].

Високоамілозна пшениця порівняно зі звичайною має істотно поліпшений харчовий статус через підвищений вміст у зерні резистентного до ферментів шлунково-кишкового травлення крохмалю, подібного за властивостями до дієтичної клітковини. Унаслідок цього загальна біологічна цінність крохмалю і зерна в цілому радикально поліпшується через істотне (до 20—30 одиниць) зниження глікемічного індексу (ГІ — швидкість зростання концентрації цукру в крові) як головного показника дієтичної цінності вуглеводних харчових продуктів. Що менший ГІ, то нижчий рівень глікемічного відгуку при вживанні таких продуктів і нижча ймовірність розвитку метаболічного синдрому та діабету другого типу [19].

Наразі ми маємо у своєму розпорядженні генетичні системи контролю біосинтезу крохмалю зерна пшениці, за допомогою яких можемо змінювати традиційне співвідношення у крохмалі 20—25 % амілози : 75—80 % амілопектину у будь-який бік. Так, скомбінувавши в одному генотипі три рецесивні алелі *wx* генів *Wx-A1* (хромосома 7AS) *Wx-D1* (хромосома 7DS) і *Wx-B1* (хромосома 7AL), які кодують ключовий ензим біосинтезу амілози GBSS, ми вперше в Україні створили пшеницю ваксі (зареєстрований сорт Софійка), в якої майже або повністю відсутня амілоза у крохмалі. Пшениця ваксі має докорінно відмінні від традиційної пшениці технологічні властивості зерна: тем-

пература желатинізації крохмалю на 10 °С нижча, ніж у звичайної пшениці, число падіння в межах 60—70 с (норма — 200—250 с), водовбирна здатність борошна 70—75 % (норма — 56—60 %). Тісто з ваксі витримує кілька циклів заморожування—розморожування. Крохмаль ваксі у ШКТ тварин чи людини трансформується в глюкозу майже на 100 %. Хімічно модифікований крохмаль використовують для виготовлення харчових загущувачів. Пшениця ваксі має перспективу використання у спирто-дистилятній промисловості. Пшеницю ваксі розглядають як основу для створення сортів пшениці кормового використання, оскільки її крохмаль на відміну від звичайної пшениці практично повністю метаболізується у шлунково-кишковому тракті (ШКТ) тварин і забезпечує їх високою метаболічно засвоюваною енергією.

Сьогодні пшениця ваксі з нульовим вмістом амілози поки що не набула широкого застосування у виробництві й промисловості. Однак це не означає, що вона не має перспектив, тому ми в невеликих обсягах продовжуємо селекцію нових, продуктивніших генотипів пшениці ваксі, які вже маємо у вигляді перспективних селекційних ліній. У разі ж зростання попиту на пшеницю ваксі ми готові розгорнути ширшу селекційну програму зі створення сортів пшениці цього типу

Ми ініціювали програму селекції сортів м'якої пшениці круп'яного напряму використання (крупи, пластівці), яка в Україні взагалі відсутня. Серед пшениць статус круп'яної культури у нас має лише тверда пшениця. Сорти ж м'якої пшениці практично всі, що зареєстровані в Україні, належать до категорії твердозерних червонозерних і призначені лише для хлібопекарського використання.

Слід наголосити, що такий продукт, як крупа, що її виготовляють із цільного зерна, в сучасних супермаркетах чи не єдиний цінний для здоров'я натуральний продукт. Його харчова цінність на відміну від інших борошняних продуктів масового вжитку (навіть звичайного хліба) не зіпсована глибокою технологічною переробкою, різними добавками типу пальмової олії, консервантів, барвників, аналогів і підсилювачів смаку тощо, які масово використовують виробники харчових продуктів і руйнують при цьому натуральність, а головне — харчову (біологічну) цінність продукту.

Крупа (пластівці) із цільного зерна на відміну від продуктів з білого борошна — це найефективніший спосіб використання харчового біологічного потенціалу цілого зерна, що зосереджений в основному у периферійних шарах зернівки.

Важливо також наголосити, що пшениця для виробництва крупи (пластівців) не потребує високого вмісту клейковини та відмінних хлібопекарських характеристик. Вона має містити багато повноцінного розчинного білка, мікроелементів, вітамінів, резистентного до ферментів травлення крохмалю, бути збалансованою за всіма біологічно цінними елементами зерна і мати не лише енергетичне, а й профілактично-лікувальне (функціональне) значення, на чому особливо наголошує сучасна національна програма здорового харчування, наприклад Франції [20].

Генетичною основою для створення сортів пшениці круп'яного використання мають бути такі характеристики зерна, як його колір та консистенція ендосперму (твердість). Найпоширеніший серед

сортів червоний колір зерна пшениці контролюють домінантні алелі від одного до трьох генів: *R-A1b* (хромосома 3AL), *R-B1b* (хромосома 3BL), *R-D1b* (хромосома 3DL) [21].

На відміну від червонозерної пшениці білий колір зерна детермінується рецесивними алелями цих генів і генотип білозерної пшениці має таку генетичну формулу: *R-A1a*; *R-B1a*; *R-D1a*. Білозерні пшениці значно поширені у світі, особливо у США, Канаді, Австралії, але на жаль не в Україні. У нашій країні практично всі сорти хлібопекарської пшениці, що занесені до Держреєстру, мають червоний колір зерна. Продукти із зерна білозерної пшениці на відміну від червонозерної мають м'який приємний смак без гіркоти, характерної для червонозерної пшениці.

Ми створили високопродуктивний селекційний матеріал білозерної пшениці для круп'яного напряму використання і вперше в Україні створили й зареєстрували сорт білозерної екстрам'якозерної пшениці під назвою Білява. Екстрам'яка консистенція ендосперму цього сорту генетично детермінується алелем *Ha*, перенесеним у геном культурної пшениці від дикорослого егілопсу *Ae. tauschii* (рис. 1, 2). Особливо приємний смак має різдвяна кутя, виготовлена на основі цілого зерна білозерної екстрам'якозерної пшениці, яка без замочування вариться до готовності всього 40—50 хвилин.

Ми вперше в Україні започаткували напрям селекції сортів білозерної хлібопекарської пшениці і вже створили перспективний матеріал білозерної твердозерної пшениці з високою хлібопекарською якістю. Перспективну селекційну лінію цієї категорії передано до Держсортовипробування під назвою Біла.

Сьогодні на харчовому ринку в цілій низці країн світу (Китай, Індія, Південна Корея, Австралія, Канада, США, Японія, Австрія, Чехія та ін.) набирає обертів впровадження продуктів здорового харчування, створених на основі унікальних сортів пшениці та ячменю із кольоровим (чорним, синім, фіолетовим) зерном. Автори цих досліджень назвали появу на ринку зернових злаків із кольоровим зерном «другою зеленою революцією», оскільки кольорове зерно як засіб його біофортифікації радикально поліпшує харчовий (біологічний) статус зерна і продуктів його переробки [22].

Різні кольори зерна (рис. 6) визначають пігменти антоціаніни і фітомеланіни. Це водорозчинні пігменти, що належать до родини флавоноїдів, які, у свою чергу, є частиною ще більшої групи біологічно активних сполук поліфенолів. Антоціаніни також відповідають за червоне, фіолетове, синє, помаранчеве та інші відтінки забарвлення різних рослинних органів, тканин, плодів. Колір ягід чорниці чи лохини визначають практично ті ж самі антоціаніни, що й фіолетовий чи чорний колір зерна пшениці та ячменю.

Згідно з результатами численних клінічних досліджень, харчові продукти, багаті на антоціаніни, вважаються такими, що забезпечують профілактику організму людини проти цілого комплексу патологій, таких як серцево-судинні хвороби, рак, діабет, гіпертонія, запалення органів, ожиріння, вони сприяють сповільненню старіння, захищають організм від руйнівного УФ-випромінювання тощо [23, 24].

Серед сортів культурної пшениці відсутні генотипи з кольоровим зерном. Найвідомішими джерелами різного кольору зерна, що їх активно використовують у селекції культурної пшениці, є такі дикорослі види, як *Triticum boeoticum*, *T. monococcum, Agropyron glaucum*, *A. tricholphorum*, *A. elongatum,* а також *Secale cereale* та ін. [25, 26].

Перенесені в геном пшениці хромосомні транслокації від пирію спричинюють появу фіолетового кольору зерна і пов'язане з ним підвищення вмісту в зерні вітамінів, цінних мінералів (у тому числі селену) та рівня його загальної антиоксидантної активності**.** Це генетичне джерело (від донора — китайського сорту Donghei 10) ми застосовуємо у селекційній програмі зі створення сортів пшениці з фіолетовим зерном круп'яного напряму використання з поліпшеною харчовою цінністю зерна.

На цій генетичній основі ми вперше в Україні створили й зареєстрували сорти озимої пшениці з фіолетовим зерном круп'яного і хлібопекарського використання з поліпшеною біологічною цінністю зерна Чорноброва і Чорнозерна. Ці сорти набирають популярності також для виготовлення хліба з пророщеного зерна (без борошна і без дріжджів) та цілющого соку із зелених 8—9-добових проростків. Слід наголосити, що сорти пшениці з кольоровим зерном нині особливо популярні в Китаї через їх найвищу порівняно з червонозерними пшеницями антиоксидантну активність зерна [27].

На основі чужинних хромосомних транслокацій від пирію ми створюємо також чорнозерну пшеницю спельту круп'яного і хлібопекарського напрямів використання, яка в найближчі роки вперше з'явиться в Україні (рис. 7).

Наша пшениця спельта має темно-фіолетовий (практично чорний) колір зерна від сорту Чорноброва, вона створена доборами типового морфотипу оригінальної дикорослої спельти у процесі п'яти перерваних бекросів на оригінальну спельту німецького походження.

Ще одним перспективним донором для створення сортів пшениці круп'яного напряму, який ми використовуємо у схрещуваннях, є чеський сорт Skorpion із синім кольором зерна. Цей сорт (районований також в Австрії) створив видатний чеський селекціонер Петро Мартінек (Petr Martinek), який передав і нам для використання у селекційній програмі багату колекцію зразків пшениці з кольоровим зерном [28].

а *б* *в* *г*

Рис. 6. Зразки зерна пшениці червоного (*а*), фіолетового (*б*), білого (*в*) і синього (*г*) кольорів (червоний і фіолетовий пігменти локалізовані в оболонці, синій — в алейроновому шарі зернівки)

Наразі ми зібрали найбільшу в Україні колекцію зразків пшениці з кольоровим зерном, отриманих із Канади, Великої Британії, Китаю, Чехії та Національного центру генетичних ресурсів рослин України (НЦГРРУ), які використовуємо у започаткованій нами вперше в Україні селекційній програмі зі створення сортів пшениці з кольоровим зерном та істотно поліпшеною харчовою цінністю зерна.

Крім генів забарвлення зерна (пов'язаних із високою антиоксидантною активністю) для круп'яної пшениці важливе значення має твердість зерна, що контролюється, як уже згадувалось, головним геном *Ha*, локалізованим у хромосомі 5DS (займає регіон ДНК 82 000 пн і містить три гени *Pin a*, *Pin b* та *Gsp-1*), та серією генів-модифікаторів. Рецесивний алель гена *Ha* детермінує високу твердість зерна, а домінантний — м'яке зерно. Висока твердість зерна потрібна для виготовлення круп, і навпаки, низька твердість важлива для виробництва пластівців.

Варіювання за ознакою твердості зерна на матеріалі дослідів ми спостерігали у вельми широкому діапазоні значень інфрачервоного аналізатора Inframatic 8611 — від від'ємного —62 (extra-soft) до додатного +69 (extra-hard). Генетична система контролю твердості зерна, яку ми використовуємо в наших дослідженнях, дає можливість отримувати генотипи з будь-якими рівнями твердості в межах зазначеного діапазону.

Аби охопити весь діапазон шкали твердості зерна і продемонструвати, як саме вихід крупи залежить від твердості зерна, ми включили у дослід зразки пшениці і тритикале, оскільки твердість зерна останнього цілком лежить у діапазоні від'ємних значень (рис. 8). Як бачимо, загальна залежність між ознакою твердості зерна і виходом крупи за жорнового (грубого) помелу зразків зерна з різною твердістю обернена: мінімальний вихід крупи 80 %, максимальний — 91 %. Однак серед зразків зерна з однаковою твердістю (як у від'ємному, так і додатному діапазонах) трапляються зразки з різницею виходу крупи до 5 %.

Важливим висновком із результатів досліджень технологічного значення твердості зерна пшениці є також чітко виражений загаль-

Рис. 7. Чорнозерна пшениця-спельта, вперше створена в Україні

ний обернений зв'язок між оцінками твердості зерна різних зразків пшениці і седиментацією SDS-30K, яка характеризує потенціал хлібопекарської якості (рис. 9). Мінімальні значення седиментації 30—35 мл мали зразки екстрам'якозерної пшениці з твердістю —58, максимальні показники SDS-30K седиментації — зразки пшениці з твердістю зерна +20. Разом з тим в одному й тому самому діапазоні твердості зерна знаходились зразки з різницею показників седиментації SDS-30K > 30 мл. Практично всі досліджені зразки озимої пшениці із задовільними для хлібопекарської якості показниками седиментації SDS-30K від 50 до 80 мл знаходились у діапазоні значень твердості від 5 до 45—48 одиниць приладу Inframatic 8611.

Весь м'якозерний та екстрам'якозерний матеріал пшениці і тритикале був оцінений за розробленою нами лабораторною процедурою виготовлення пластівців. За критерій оцінки якості пластівців було взято їх здатність зберігати структуровану форму після прокочування обробленого (під тиском) парою зерна на вальцях, а також колір і форму пластівців.

У результаті оцінювання ми отримали практично однозначні висновки про те, що найгіршу якість мали пластівці з контрольних твердозерних зразків пшениці, найліпшу — зі зразків із крайніми від'ємними значеннями твердості зерна — екстрам'якозерні (рис. 10). Особливо високоякісними за формою і зовнішнім виглядом були пластівці, виготовлені із зерна білозерних екстрам'якозерних зразків пшениці, в тому числі із зерна білозерної екстрам'якозерної пшениці сорту Білява.

Толерантність до посухи, яка з року в рік лише посилюється, набуває у селекції сортів зернових культур стратегічного значення, тому ми у наших селекційних програмах приділяємо толерантності до посухи особливу увагу. В результаті багаторічних спостережень за селекційним матеріалом озимої пшениці в умовах жорсткої посухи в регіоні Одеси ми дійшли висновку, що найвищу посухостійкість за прямими селекційними критеріями виповненості зерна (5 балів) та натура зерна (800—820 г/л) мав матеріал, отриманий від схрещувань

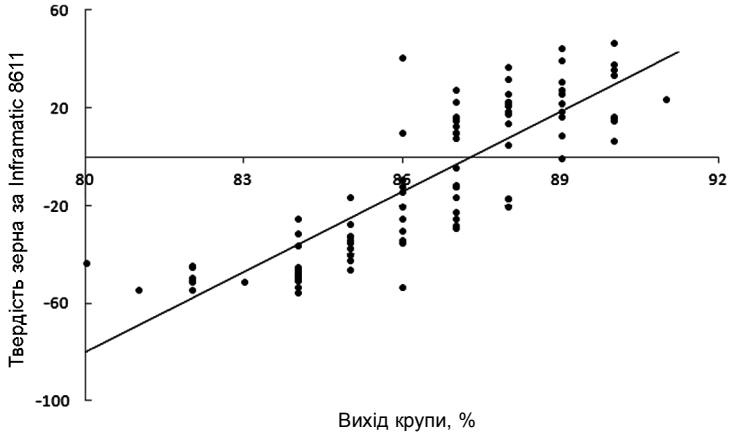


Рис. 8. Загальний вихід крупи жорнового помелу зерна селекційних ліній пшениці й тритикале з різною твердістю зерна (n = 96, r = 0,839, P > 0,05...0,001)

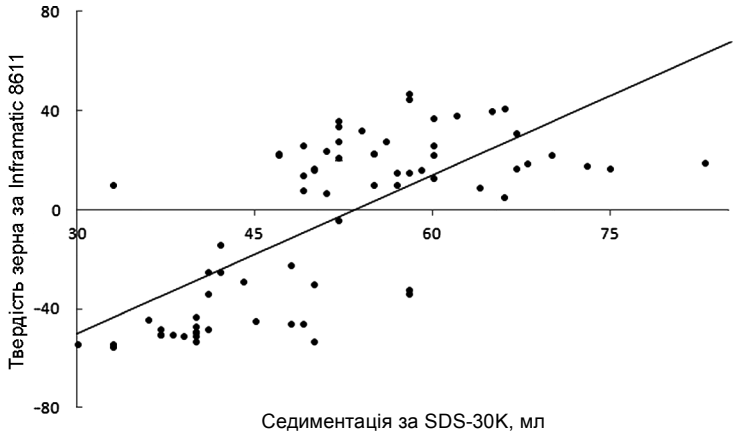


Рис. 9. Залежність між твердістю зерна та седиментацією SDS-30K борошна селекційних ліній озимої пшениці (n = 71, r = 0,711, P > 0,05...0,001)

культурної пшениці з гексаплоїдними амфіплоїдами-синтетиками (геномна формула 2n = 6x = 42, AABBDD), про які йшлося раніше. Особливо високу посухостійкість у наших дослідах в жорстких посушливих умовах мали селекційні лінії білозерної пшениці, які також походили від схрещувань культурних сортів з амфіплоїдами-синтетиками.

Не менш важливі, ніж на пшениці, результати створення посухостійких генотипів зернових культур ми отримали на культурі тритикале, яке загалом посухостійкою культурою не вважається. На жаль, українські селекціонери вивели на поля сорти тритикале з незадовільним вимолотом зерна, що спрацювало проти самої культури. Посухостійкість і якісний вимолот зерна — головні агрономічні ознаки, яким ми приділяли і приділяємо особливу увагу на культурі тритикале.

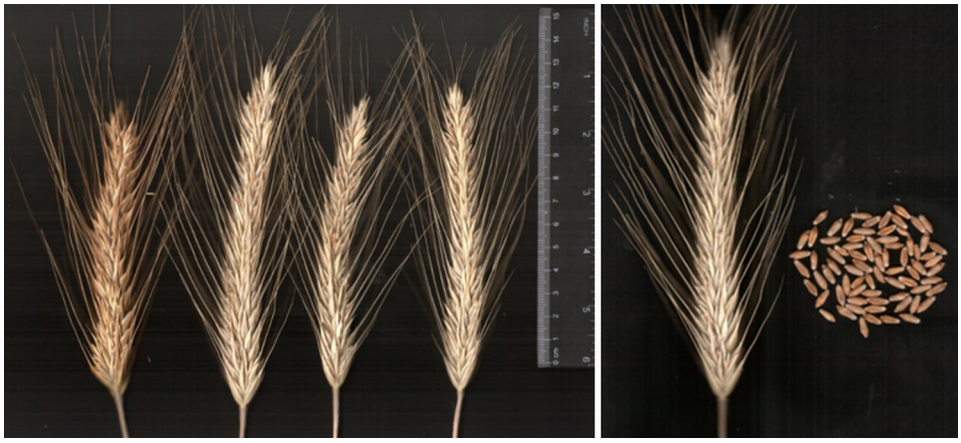
Наші дослідження з культурою тритикале пов'язані з використанням у схрещуваннях міжхромосомного заміщення (5B)5D (A. Lukazsewski), яке через відсутність хромосоми 5B індукує алосиндез (кон'югацію та рекомбінацію) між хромосомами пшениці і жита. У результаті ми отримали в схрещуваннях активну міжхромосомну рекомбінацію і широке генетичне різноманіття для добору. Посиленню рекомбінаційного процесу у тритикале сприяло також схрещування ліпших його ліній із сортом озимої пшениці ваксі Софійка. Як наслідок ми отримали серію селекційних ліній тритикале з червоним і білим колосом, дібрали з популяцій генотипи тритикале з високими посухостійкістю і якістю вимолоту зерна (рис. 11). Більшість дібраних нами ліній мають вимолот зерна ліпший, ніж у сортів пшениці.

За попередні роки в популяції від схрещувань ліпших селекційних ліній озимого тритикале з озимою пшеницею ваксі сорту Софійка ми вперше виділили оригінальні лінії тритикале з білим колосом. Цей матеріал періодичними доборами було доведено до стабільного стану і в 2018 р. вперше оцінено в ділянкових посівах. Лінії тритикале з білим колосом показали дуже високу стійкість до посухи.

Рис. 10. Пластівці із зерна озимої пшениці та тритикале різної твердості: *1* — СЛ-8107 білозерна (—50); *2* — Чорноброва (+20); *3* — СЛ-8053 білозерна (—54); *4* — СЛ-8055 тритикале (—37); *5* — СЛ-8087 червонозерна (—34); *6* — СЛ-8093 тритикале (—42)

У нашому досліді 2018 р. рекордний урожай зерна 92,7 ц/га дала білоколоса лінія тритикале (СЛ7072/6940), яка вирізнялася також високою посухостійкістю і високими виповненістю та вимолотом зерна (див. рис. 11). Ця лінія має дуже м'який колос, який легко вимолочується. Лінія передана у 2018 р. до Держсортовипробування під назвою Альбіна. Інша створена нами селекційна лінія тритикале з червоним колосом, високою посухостійкістю і відмінним вимолотом зерна занесена до Держреєстру під назвою Пріоритет.

Загалом селекційні лінії тритикале з білим колосом дали максимальний у досліді врожай зерна (> 90 ц/га) й показали відмінну виповненість зерна як вияв ознаки посухостійкості, що для культури тритикале особливо важливо. Максимальне значення натури зерна для тритикале у дослідах 2018 р. становило 787 г/л. Однак ліпші лінії



а *б*

Рис. 11. Колоси селекційних ліній озимого тритикале з червоним і білим колосом (*а*) та посухостійка лінія озимого тритикале (СЛ7072/6940) з білим колосом, високими виповненістю та вимолотом зерна (*б*)

тритикале за показником натури зерна не досягали значень ліпших ліній озимої пшениці.

У результаті виконання наукової програми з вивчення спиртодистилятних характеристик зерна тритикале ми отримали високопродуктивні лінії озимого тритикале зі спирто-дистилятним потенціалом виходу абсолютного етанолу з 1 т зерна більш як 400 л. На підставі цих даних ми вважаємо, що культура тритикале заслуговує на одне з чільних місць у спиртовій галузі як цінна зернова сировина для виробництва питного спирту і біоетанолу. Наше бачення стратегії селекції культури тритикале викладено у статті [29].

Нова для України культура (правильніше добре забута стара) голозерного ячменю за останні 10—15 років набирає популярності в розвинених країнах світу як культура харчового напряму використання з високим функціональним статусом. У зв'язку з висновками сучасних наукових досліджень харчових характеристик зерна останніх років ячмінь у низці розвинених країн (Канада, Австралія, США, Південна Корея, Китай) характеризують як «супер-фуд», а світова селекція голозерного ячменю орієнтує цю культуру перш за все у напрямі харчового використання [30].

Ми ініціювали найбільшу в Україні селекційну програму зі створення сортів ярого та озимого голозерного ячменю. Протягом кількох років ретельного дослідження популяцій від схрещувань різних сортів і селекційних ліній ячменю типу голозерний × плівчастий ми сформулювали концепцію, яка визначає стратегію селекції сортів голозерного ячменю як нової культури в Україні. Наша концепція селекції голозерного ячменю акцентує увагу на ключових селекційних ознаках, системне поліпшення яких добором пар для схрещувань і цілеспрямованим добором у популяціях гарантує успіх створення конкурентних сортів голозерного ячменю, які мають шанс бути прийнятими виробництвом.

Серед згаданих ключових селекційних ознак голозерного ячменю такі: 1) незмінно важливою ознакою для голозерного ячменю (як і для плівчастого) є стійкість рослин ячменю до полягання; 2) висока якість (повнота) вимолоту зерна голозерного ячменю специфічна селекційна ознака саме голозерного ячменю; 3) форма зерна і конфігурація зародка зернівки — вирішальні ознаки голозерного ячменю, від яких залежить польова схожість насіння; 4) рядність, фізичні та морфологічні особливості колоса, які визначають якість вимолоту зерна голозерного ячменю.

Лише системне поліпшення усіх перелічених ознак гарантує успіх селекції сортів голозерного ячменю.

Об'єктом наших досліджень на культурі голозерного ячменю є система генів, що відповідають перш за все за харчові характеристики зерна: це рецесивний алель *nud*, що контролює в ячменю ознаку «голозерність», або відсутність зв'язувального ліпідного прошарку між оболонкою зерна і плівкою ячменю; ген *Wax,* рецесивний алель якого *wax* блокує біосинтез амілози і зумовлює високий вміст цінної у харчовому відношенні розчинної дієтичної клітковини β-глюканів у зерні ячменю; мутантні гени *lpa,* які детермінують низький вміст

органічного (зв'язаного) та підвищений вміст мінерального (доступного) фосфору в зерні ячменю; генетичні системи мутантних генів, які підвищують вміст амілози у крохмалі та блокують біосинтез запасних білків зерна гордеїнів.

Цю систему генів, а також генний комплекс, що контролює біосинтез біоактивних пігментів зерна з антиоксидантною функцією, ми впровадили у найбільшу в Україні селекційну програму створення сортів голозерного ячменю харчового напряму використання з високим вмістом у зерні білка, розчинної дієтичної клітковини β-глюканів, мінерального фосфору, ключових мінералів та високою загальною антиоксидантною активністю зерна.

Першим успішним результатом нашої селекційної програми створення сортів голозерного ячменю став сорт ярого голозерного дворядного ячменю Ахіллес, дібраний з популяції від схрещування сорту типового південного екотипу Южний із сортом Jet (зразок з Ефіопії) (рис. 12). Сорт Ахіллес занесений до Держреєстру України. Високопродуктивний ярий сорт Ахіллес харчового напряму використання належить до унікального ботанічного різновиду *glabronudum* (голе зерно і гладенькі ості), має високу стійкість до полягання, високі холодостійкість і вміст протеїну в зерні. Повнота вимолоту зерна перевищує 97 %. Максимальний зафіксований урожай зерна становив 82 ц/га. Сповна потенціал високої зернової продуктивності ячменю ярого сорту Ахіллес може бути реалізований лише при посіві в максимально ранні строки.

Оскільки сортів голозерного ячменю в Україні обмаль, у нашій програмі селекції голозерного ячменю основним типом міжсортових схрещувань є голозерний × плівчастий, що дає можливість максимально використати генетичний потенціал існуючих сортів плівчастого ячменю як української, так і іноземної селекції.

У перші роки розвитку нашої програми селекції сортів голозерного ячменю озимого та альтернативного типів розвитку серед існуючого сортименту вітчизняних сортів ми не мали надійних джерел високої стійкості до полягання. Ця ознака була, є і залишиться критичною в селекції озимого (альтернативного) ячменю. Найліпшим джерелом стійкості рослин ячменю до полягання у нашій програмі вже протягом багатьох років залишається німецький сорт шестирядного плівчастого ячменю Cinderella (ФРН), рівного якому серед вітчизняних сортів озимого ячменю за стійкістю до полягання ми не знаємо. На основі цього сорту в нашій селекційній програмі закладено надійний генетичний базис стійкості рослин озимого ячменю до полягання. На основі сорту Cinderella ми створили селекційний матеріал озимого ячменю зі стійкістю до полягання навіть вищою, ніж у багатьох сортів озимої пшениці.

Серед стійкого до полягання селекційного матеріалу ми вибрали перспективну селекційну лінію, яка нині занесена до Держреєстру України під назвою Крікс (рис. 13). Для сорту Крікс зафіксовано максимальний урожай зерна близько 100 ц/га, висота його рослин 85—90 см. Він не полягає при високих урожаях. Рослини мають дуже високу кущистість, тому норма висіву схожого насіння має не пе-

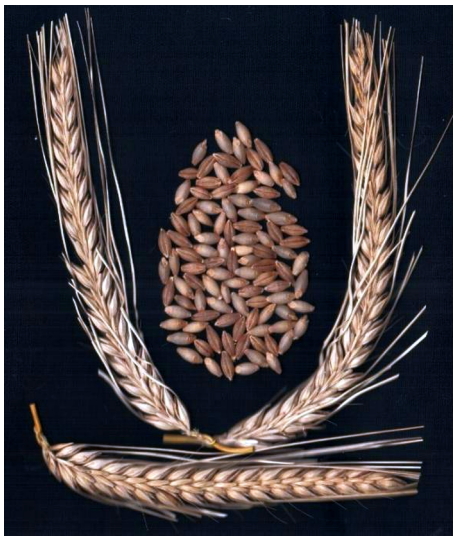


Рис. 12. Колоси і зерно дворядного голозерного ячменю сорту Ахіллес

ревищувати 2—2,5 млн/га. Сорт рекомендований для кормового використання.

Протягом кількох років ми вивчали зв'язок морфологічних і фізичних характеристик колоса голозерного ячменю з важливою селекційною ознакою — повнотою вимолоту зерна. В результаті дійшли висновку, що найвища повнота вимолоту зерна голозерного ячменю (~ 98—100 %) досягається у селекційних ліній з м'яким дворядним остистим колосом. Ми чітко визначили для добору еталонний морфотип дворядного остистого колоса, який майже ідеально вимолочується. Це дало нам можливість практично вирішити питання вимолоту голозерного ячменю і створити селекційний матеріал з повнотою вимолоту зерна близькою до вимолоту пшениці. Селекційний матеріал із шестирядним колосом (як остистий, так і безостий, і дворядний безостий) істотно поступається (за рідкісними винятками) морфотипу голозерного ячменю, який ми визначили як еталон [34].

Як джерело радикального поліпшення харчової цінності зерна голозерного ячменю за вмістом розчинної клітковини і резистентного крохмалю ми використовуємо у схрещуваннях унікальний мутантний сорт ячменю Himalaya 292, створений відомою австралійською корпорацією CSIRO (незалежне федеральне науково-виробниче об'єднання Австралії). Цей сорт голозерного ячменю містить індуковану азидом натрію single-point мутацію у регіоні гена *Sex6* у вигляді стоп-кодону, який блокує трансляцію транскриптів гена синтази крохмалю *SSIIa*.

Через мутацію зерно сорту Himalaya 292 містить всього близько 18 % крохмалю (норма 60—65 %), який на 71 % складається з амілози, 25 % некрохмалистих полісахаридів і понад 10 % β-глюканів [31, 32]. Ця наукова програма нині знаходиться на стадії отримання перспективних селекційних ліній ярого та озимого (альтернативного) ячменю шляхом доборів у популяціях від схрещування ліпших сортів

Рис. 13. Сорт альтернативного типу розвитку шестирядного голозерного ячменю Крікс

озимого та ярого плівчастого ячменю з мутантом Himalaya 292 й отримання селекційних ліній з характеристиками зерна вихідного мутанта Himalaya 292.

Мутація в локусі *Sex6* сорту Himalaya 292 істотно знижує (від 60—65 % до 18 %) вміст у зерні крохмалю й радикально підвищує вміст у крохмалі амілози (від 20—25 % до 71 %), морфологічно виявляється у вигляді сплюснутого по товщині зерна з глибокою борозенкою (рис. 14). Мутація ідентифікується лише за допомогою рестрикційного ПЛР-аналізу.

Зниження вмісту в зерні крохмалю неодмінно веде до зниження врожаю зерна генотипів із мутацією, однак харчова цінність такого зерна порівняно з немутантним незрівнянно вища. Крім того, до мутантного генотипу Himalaya 292 ми додаємо чорне і синє забарвлення зерна, що істотно поліпшує харчову цінність зерна і похідних від нього харчових продуктів.

Селекційну програму біофортифікації зерна на основі генетичного матеріалу з кольоровим зерном ми здійснюємо як на пшениці, так і на голозерному ячмені.

Зразки ячменю з чорним зерном містять пігменти фітомеланіни з антиоксидантною функцією і високоактивний пігмент-антиоксидант дельфінін-3-глюкозид (delphinin-3-glucoside), тісно пов'язаний з чорною пігментацією зернівки (рис. 15, 16).

Зразки голозерного ячменю із синім зерном мають істотно вищу антиоксидантну активність, ніж ячмінь із жовтим чи білим кольором зернівки [33]. Крім ячменю зі звичайним синім зерном ми отримали рекомбінантну лінію голозерного ячменю з унікальним інтенсивно синім зерном (рис. 17).

Щоб надати високої антиоксидантної активності зерну голозерного ячменю, ми використовуємо у схрещуваннях кілька джерел чорнозерного ячменю африканського походження (наприклад, афри-

Рис. 14. Мутантний зразок голозерного ячменю Himalaya 292 з унікальними характеристиками харчової цінності зерна (CSIRO, Австралія)

канський аборигенний зразок R 118, який отримали з колекції Великої Британії, Норвіч, зразок Jet (Ефіопія) та низку інших).

На питання аграріїв, чи економічно вигідно вирощувати голозерний ячмінь, даємо таку відповідь. Головним продуктом переробки ячменю в Україні є крупа — за нашими поняттями корисний для здоров'я, 100 % натуральний продукт без жодних шкідливих добавок. При переробці звичайного плівчастого ячменю вихід, наприклад, ячної крупи становить 55—60 %. При цьому в результаті технологічної операції шліфування плівчастого зерна у відходи разом із плівкою потрапляє майже вся оболонка зерна і зародок, що є біологічно найціннішими компонентами зерна за вмістом повноцінного білка, вітамінів, мінералів і біоактивних сполук. При переробці зерна голозерного ячменю, яка виключає шліфування зерна, вихід ячної крупи становить близько 95 %. Ця крупа має істотно вищий вміст білка, містить практично без втрат усі біологічно важливі компоненти зерна й біологічно є незрівнянно ціннішим харчовим продуктом, ніж крупа із плівчастого ячменю. Особливо це стосується крупи із голозерного ячменю з чорним і синім зерном (див. рис. 17).

Клейковина як пшениці, так і ячменю (хоча й значно меншою мірою, ніж пшениці) характеризується імунореактивністю, або здатністю індукувати у кишківнику чутливих осіб аутоімунну реакцію (запалення). Крайнім виявом гострої патологічної реакції на клейковину є спадкова хвороба целіакія, яка спричинює цілковите несприй-

Рис. 15. Зразки голозерного ячменю з різним забарвленням зернівки

а *б*

Рис. 16. Селекційні лінії голозерного ячменю зі звичайним жовтим (*а*) і чорним (*б*) зерном

а *б* *в*

Рис. 17. Зразки крупи із зерна плівчастого ячменю (*а,* вихід 60 %), голозерного ячменю з жовтим зерном (*б*, вихід 95 %) і голозерного ячменю з чорним зерном (*в,* вихід 95 %)

няття харчових продуктів, виготовлених із зерна пшениці, жита, тритикале чи ячменю, причому чисельність осіб-носіїв цієї патології у світі невпинно зростає [35].

У зв'язку з цим у розвинених країнах світу активно проводяться біотехнологічні дослідження, спрямовані на створення безглютенової пшениці та безглютенового (gluten free) ячменю. За допомогою сучасних трансгенних технологій блокування генів (RNAi) або редагування геному з використанням технології TUNR (CRISPR-Cas9) вже створено безглютенову пшеницю [36].

Група вчених із CSIRO (Австралія) шляхом звичайної селекції створила безглютеновий ячмінь [37]. Як безглютенова пшениця, так і безглютеновий ячмінь — це сучасні надприбуткові багатомільярдні комерційні проекти. Створити такий матеріал в Україні за відсутності сучасних біотехнологій чи придбати готовий у авторів-оригінаторів практично неможливо. Через це ми ініціювали селекційну програму створення безглютенового ячменю на нашій існуючій дослідній базі. На відміну від австралійських колег ми ставимо перед собою завдан-

ня створити безглютеновий ячмінь із чорним (синім) зерном і поліпшеною харчовою цінністю.

Створення безглютенового (точніше ультранизькоглютенового) ячменю — доволі складний процес комбінування в одному генотипі трьох генетично незалежних мутацій, що блокують біосинтез B-, C-, D-гордеїнів (рис. 18), та ген забарвлення зерна.

Біосинтез гордеїнів (білків клейковини, глютену) ячменю кодується складною мультигенною системою, яка включає чотири локуси (*Hor1*, *Hor2*, *Hor5*, *Hor3*). Три перших локуси розміщені в короткому плечі хромосоми 1H, а локус *Hor3* — в довгому її плечі. Мультигенний локус *Hor1* кодує біосинтез родини C-гордеїнів із молекулярною масою 50–60 кД, а супресію цього локусу здійснює локус *lys3a*, локалізований у хромосомі 5H. Біосинтез родини B-гордеїнів із молекулярною масою 35—45 кД (~12 протеїнів) кодує локус *Hor2*. D-гордеїн ячменю представлений одним протеїном із молекулярною масою 106 кД і кодується локусом *Hor3*. Локус *Hor5*, що включає 2 гени (3 протеїни з масою 36—45 кД), тісно зчеплений із локусом *Hor2* і кодує біосинтез γ-гордеїнів (3 протеїни з масою 36—45 кД) [38].

Ми виконуємо наукову програму створення безглютенового ячменю за австралійською моделлю з використанням трьох мутантів ячменю Riso 1508 (відсутні C-гордеїни), Riso 56 (відсутні B-гордеїни) та місцевий спонтанний мутант голозерного ячменю з Ефіопії R 118 (відсутні D-гордеїни). Мутанти Riso 1508 і Riso 56 ми отримали з колекції Департаменту сільського господарства США. Детекцію гордеїндефіцитних мутацій здійснюємо паралельно прямими методами електрофоретичного аналізу гордеїнів та методами ПЛР-аналізу (рис. 18, 19).

Комбінування цих трьох генетично незалежних мутацій в одному генотипі дасть змогу створити ячмінь з ультранизьким вмістом глютену не більш як 5 ppm, що в 4 рази нижче від мінімального порогу 20 ppm, визначеного FDA (Food and Drug Administration, USA) для харчових продуктів, що ідентифікуються як безглютенові (gluten-free) [35, 36].

Наші дослідження харчового голозерного ячменю цілком узгоджуються зі світовою тенденцією активного відродження харчового ячменю, який, згідно з даними численних клінічних досліджень останніх 15—20 років, визнаний продуктом функціонального харчуван-

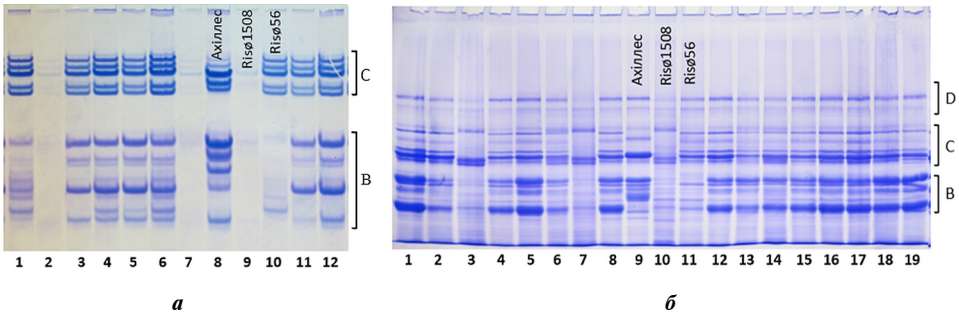


Рис. 18. Електрофореграми ідентифікації гордеїндефіцитних мутацій ячменю за допомогою mini-A-PAGE (*а*) та mini-SDS-PAGE (*б*)

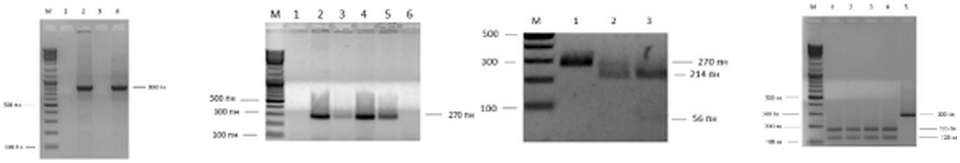


Рис. 19. ПЛР ідентифікація гордеїндефіцитних мутацій, що блокують біосинтез B-, C- і D-гордеїнів ячменю

ня, що знижує ризик захворювання на найбільш смертоносні патології сучасного людства: коронарну хворобу серця, діабет другого типу, рак [34].

REFERENCES

1. Hsu, P., Lander, E. & Zhang, F. (2014). Development and application of CRISPR-Cas9 for genome engineering. Cell, 157, Elsevier Inc., pp. 1262-1278.
2. Gorafi, Y., Kim, J.-S., Elbashir, A. & Tsujimoto, H. (2018). A population of wheat synthetic derivatives: an effective platform to explore, harness and utilize genetic diversity of Aegilops tauschii for wheat improvement. Theor. Appl. Genet., 131, pp. 1615-1625.
3. Cox, T., Wu, J., Wang, Sh., Cai, J., Zhang, Q. & Fu, B. (2017). Comparing two approaches for introgression of germplasm from Aegilops tauschii into common wheat. https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.05.006
4. Rybalka, O.I. (2011). Wheat quality and its improvement. Kyiv: Logos [in Ukrinian].
5. Rybalka, O.I., Morgun, V.V. & Pochinok, V.M. (2012). Genetic bases of wheat varieties by specialization of their technological use. Physiology and biochemistry of cult. plants, 44, No. 2, pp. 95-124 [in Ukrainian].
6. D'Ovidio, R., Masci, S., Porceddu, E. & Kasarda, D. (1997). Duplication of the Bx7 high-molecular-weight glutenin subunit gene in bread wheat (Triticum aestivum L.) cultivar Red River 68. Plant Breeding, 116, pp. 525-531.
7. Blechl, A. & Anderson, O. (1996). Expression of a novel high-molecular-weight glutenin subunit gene in transgenic wheat. Nature Biotechnol, 14, pp. 875-879.
8. Howell, T., Hale, I., Jankulosky, L., Bonafede, M., Gilbert, M. & Dubcowsky, J. (2014). Mapping a region within 1RS.1BL translocation in common wheat affecting grain yield and canopy water status. Theor. Appl. Genet., 127, pp. 2695-2709.
9. Johnson, V., Mattern, P., Peterson, C. & Kuhr, S. (1985). Improvement of wheat protein by traditional breeding and genetic techniques. Cereal Chemistry, 62, pp. 350-355.
10. McIntosh, R.A., Dubcovsky, J., Rogers, W.J., Rogers, W.J., Morris, C., Appels, R. & Xia, X.C. (2013). Catalogue of Gene Symbols for Wheat. 12th Int. Wheat Genet. Symp. 8-13 Sept. 2013, Yokohama, Japan.
11. Cakmak, I., Torun, A., Millet, E., Feldman, M., Fahima, T., Korol, A., Nevo, B., Braun, H. & Ozkan, H. (2004). T. dicoccoides: an important genetic resource for increasing zinc and iron concentration in modern cultivated wheat. Soil. Sci. Plant Nutr., 50, pp. 1047-1054.
12. Uauy, C., Brevis, J. & Dubcovsky, J. (2006). The high grain protein content gene Gpc-B1 accelerates senescence and has pleiotropic effects on protein content in wheat. J. Exp. Bot., 57, pp. 2785-2794.
13. Uauy, C., Distelfeld, A., Fahima,T., Blechl, A. & Dubcovsky, J. (2006). A NAC gene regulating senescence improves grain protein, zinc and iron content in wheat. Science, 314, pp. 1298-1301.
14. Distelfeld, A., Uauy, C., Fahima, T. & Dubcovsky, J. (2006). Physical map of the wheat high-grain protein content gene Gpc-B1 and development of a high-throughput molecular marker. New Phytol., 169, pp. 753-763.
15. Tabbita, F., Pearce, S. & Barneix, A. (2017). Breeding for increased grin protein and micronutrient content in wheat: Ten years of the GPC-B1 gene. J. Cereal Sci., 73, pp. 183-191.

16. Stepanenko, A.I., Morgun, B.V. & Rybalka, O.I. (2014). Molecular markers for detection in wheat QTL Gpc-B1, transferred from T. dicoccoides. Proceedings of the XIV Biotechnology in plant growing, animal husbandry and veterenary medicine (pp. 50-52), 16 Apr. 2014, Moscow, Russia [in Russian].
17. Rybalka, O.I., Morgun, B.V. & Polyshchuc, S.S. (2018). GPC-B1(NAM-B1) gene as a new genetic resource in wheat breeding for high grain protein content and micronutrients. Fiziol. rast. genet., 50, No. 4, pp. 279-299 [in Ukrainian].
18. Morgun, B.V., Stepanenko, O.V., Stepanenko, A.I. & Rybalka, O.I. (2015). Molecular-genetic identification of Wx genes polymorphism in wheat hybrids by multiplex polymerase chain reactions. Fiziol. rast. genet., 47, No. 1, pp. 25-35 [in Ukrainian].
19. Rybalka, O.I., Morgun, V.V., Morgun, B.V. & Pochynoc, V.M. (2015). Agronomic potential and perspectives of triticale. Fiziol. rast. genet., 47, No. 2, pp. 95-112 [in Ukrainian].
20. Hercberg, S., Chat-Yung, S. & Chauliac, M. (2008). The French National Nutrition and Health Program: 2001—2006—2010. Int. J. Public Health, 53, pp. 68-77.
21. Sherman, J., Souza, E., See, D. & Talbert, L. (2008). Microsatellite markers for kernel color genes in wheat. Crop Science, 48, pp. 1419-1424.
22. Guo, Z., Xu, P., Zhang, Z. & Guo, Y. (2012). Segregation ratios of colored grains in F1 hybrid wheat. Crop Breeding and Applied Biotechnology, 12, pp.126-131.
23. Andersen, Sh. & Jordheim, M. (2006). The anthocyanins. In Flavonoids: Chemistry, Biochemistry and Applications. Sh., Andersen, K.R., Markham (Eds.) (pp. 471-552). Boca Raton, FL: CRC Press.
24. Jacobs, D. & Steffen, L. (2003). Nutrients, foods, and dietary patterns as exposures in research: A framework for food synergy. Amer. J. Clin. Nutr., 78, pp. 508-513.
25. Li, W., Shan, F., Sun, Sh., Corke, H. & Beta, T. (2005). Free radical scavenging properties and phenolic content of Chinese black-grained wheat. J. Agric. Food Chem., 53(22), pp. 8533-8536.
26. Zeven, A.C. (1991). Wheats with purple and bluegrains — a review. Euphytica, 56, pp. 243-258.
27. Nandy, S., Chen, Q., Cheng Sun, Sh., Ahmad, F., Graf, R. & Kereliuk, G. (2008). Nutritional analyses and their inheritance properties in colored wheat seed lines from different origins using near-infrared spectroscopy. Amer. J. Plant Sci. Biotech., 2(2), pp. 74-79.
28. Martinek, P., Scorpic, M., Chrpova, J., Fucik, P. & Schweiger, J. (2013). Development of the new wheat variety Skorpion with blue grain. Czech. J. Genet. Plant Breed., 49(20), pp. 90-94.
29. Rybalka, O.I., Morgun, V.V., Morgun, B.V. & Pochinok, V.M. (2015). Agronomic potential and perspectives of triticale. Fiziol. rast. genet., 47, No. 2, pp. 95-111 [in Ukrainian].
30. Newman, C. & Newman, R. (2005). Hulless barley for food and feed. In: Specialty grains for food and feed. E. Abdel-Aal, P. Wood eds. Amer. Association of Cereal Chemists. St. Paul, MN, pp. 167-202.
31. Morell, M., Kosar-Hashemi, B., Cmiel, M., Samuel, M., Chandler, P., Rahman, S., Buleon, A., Batey, I. & Li, Z. (2003). Barley sex6 mutants lack starch synthase IIa activity and contain a starch with novel properties. Plant J., 34, pp. 173-185.
32. Topping, D., Morell, M., King, R., Li, Z., Bird, A. & Noakes, M. (2003). Resistant starch and health — Himalaya 292, a novel barley cultivar to deliver benefits to consumers. Starch, 55, pp. 539-545.
33. Rybalka, O.I., Morgun, V.V. & Morgun, B.V. (2020). Colored grain of wheat and barley — a new breeding strategy of crops with grain of high nutritional values. Fiziol. rast. genet., 52, No. 2, pp. 95-128 [in Ukrainian].
34. Rybalka, O.I. Morgun, B.V. & Polyshchuk, S.S. (2011). Barley as a product of functional nutrition. Kyiv: Logos [in Ukrinian].
35. Fasano, A., Berti, I., Gerarduzzi, T., Not, T., Colletti, R., Drago, S. & Elitsur, Y. (2003). Prevalence of celiac disease in at-risk and not-at-risk groups in the United States — a large multicenter study. Arch. Intern. Med., 163, pp. 286-292.
36. Sanchez-Leon., R., Gil-Humanes, J., Ozuna, C., Gimenez, M., Sousa, C., Voytas, D. & Barro, F. (2018). Low-gluten, nontransgenic wheat engineered with CRISPR/Cas9. Plant Biotechnol. J., 16, pp. 902-910.
37. Tanner, G., Blundell, M., Colgrave, M. & Howitt, C. (2016). Creation of the first ultra-low gluten barley (Hordeum vulgare L.) for coeliac and gluten-intolerant populations Plant Biotechnol. J., 14, pp. 1139-1150.

38. Brennan, C., Smith, D., Harris, N. & Shewry, P. (1998). The production and characterization of Hor3 null lines of barley provides new information on the relationship of D hordein to malting performance. J. Cer. Sci., 28, pp. 291-299.
39. Rybalka, O.I., Katrii, V.B., Morgun, B.V. & Poiyshshuk, S.S. (2020). Barley locus sex 6 mutation that substantionally improves nutritional grain values. Fiziol. rast. genet., 52, No. 3, pp. 238-247 [in Ukrainian].

Received 25.02.2021

NEW SCIENTIFIC APPROACHES IN GENETIC AMELIORATION OF CEREAL CROPS

V.V. Morgun[2], O.I. Rybalka[1,2], B.V. Morgun[2,3]

[1]Plant Breeding and Genetics Institute—National Centre of Seed and Cultivars Investigation, National Academy of Agricultural Sciences of Ukraine
3 Ovidiopolska Road, Odesa, 65036, Ukraine
[2]Institute of Plant Physiology and Genetics, National Academy of Sciences of Ukraine
31/17 Vasylkivska St., Kyiv, 03022, Ukraine
[3]Institute of Cell Biology and Genetic Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine
148 Academic Zabolotny St., Kyiv, 03680, Ukraine
e-mail: molgen@icbge.org.ua

Based on original genetic variability, in terms of its effects on grain protein, starch and bioactive grain compounds biosynthesis, several new approaches in breeding of winter wheat, winter wheat-spelt, winter/spring hull-less barley and winter triticale were initiated. The final purpose of our initiatives is to introduce on the Ukrainian grain market an array of new varieties of the cereal crops mentioned above with biochemical, technological and nutritional grain characteristics required for development of new food products with functional food status as well as new grain technology end-use. Available in our breeding programs genetic variability, specially developed or transferred to cultivated wheat genome from wild species (gout grass *Aegilops tauschii* (2n = 2x = 14), *Ae. cylindrica* (2n = 4x = 28), wild emmer *Triticum dicoccoides* (2n = 4x = 28) allows us to develop the new bread and biscuit wheat cultivars of the highest quality on red or white grain base. Newly introduced to our breeding programs the original genetic resources makes possible purposefully as well as in the large scale manipulate by wheat grain texture, nutritional and technological starch properties, grain hardness, technological and milling grain characteristics, that is entirely new for Ukrainian breeding, and that allows to enhance substantially the technological and nutritional wheat potential. We were first who initiated development in Ukraine new varieties of winter bread wheat and spelt-wheat, food end-use hull-less barley all possessing with colored (purple, black and blue) grain that allows substantially ameliorate nutritional and functional grain status as well as grain-derived food products of those crops. On the base of colored grain as well as on the wide grain hardness of wheat and food end-use hull-less barley grain we initiated the new for Ukrainian breeding developments – special end-use varieties for grouts and flakes. We also focus on the popularization in Ukraine of the whole-grain food derived from colored cereal grain as an important nutritional factor of health benefits. We initiated new breeding programs of the food end-use hull-less barley (winter, spring, alternative) varieties with elevated grain protein and soluble dietary fiber (beta-glucan), high amylose, low phytate, high anthocyanin and phytomelanin content, high grain antioxidant activity, unique nutrition black grained hull-less barley with ultra-low gluten content. Based on our own research as well as on the widely published foreign developments we make conclusion that the cereal functional food program should become as a state supported strategic program aimed on the health promotion of the Ukrainian nation.

Key words: wheat, spelt, hull-less barley, triticale, grain quality, proteins, resistant starch, gene introgression, amylose, amylopectin, anthocyanins, antioxidants.